



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Формирование режущего рельефа алмазного круга на металлической связке посредством непрерывной электрохимической правки при комбинированном электроалмазном шлифовании композиционных материалов: к вопросу создания гибридного станочного оборудования

Вадим Скиба^{1,а,*}, Андрей Янюшкин^{2,б}, Дмитрий Лобанов^{2,с}, Александр Янюшкин^{2,д},
 Алексей Черников^{1,е}, Мария Яворская^{1,ф}, Александр Насонов^{1,г}

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр-т Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>,  andreyyanyushkin@gmail.com;
^с  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru; ^д  <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  yanyushkinas@mail.ru;
^е  <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>,  aleksey.chernikov.97@mail.ru; ^ф  <https://orcid.org/0000-0002-2449-8638>,  ivanova777888@yandex.ru;
^г  <https://orcid.org/0009-0001-3177-0732>,  a.nasonov@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.04:621.9.048:621.785

История статьи:

Поступила: 27 февраля 2026
 Рецензирование: 16 марта 2026
 Принята к печати: 21 марта 2026
 Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Алмазный круг на металлической связке
 Комбинированное электроалмазное шлифование
 Непрерывная электрохимическая правка
 Композиционные материалы
 Режущая способность
 Оксидные плёнки
 Гибридное станочное оборудование
 Анодное растворение припуска

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSUN-2026-0005).

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из ключевых тенденций современного машиностроения является разработка гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции в рамках единой станочной платформы. В контексте концепции Индустрии 4.0 и возрастающих требований к точности, производительности и многофункциональности оборудования особую актуальность приобретает комбинированное электроалмазное шлифование, совмещающее механическое резание алмазными зёрнами с электрохимическим воздействием на инструмент и обрабатываемый материал. Шлифование высокопрочных композиционных материалов на основе диоксида циркония (ZrO₂) в обычных условиях сопровождается интенсивным засаливанием алмазных кругов на металлической связке и критическим снижением их режущей способности, что делает традиционный процесс неэффективным. Несмотря на имеющиеся результаты в области электроалмазной обработки, вопросы стадийного формирования режущего рельефа рабочей поверхности круга в условиях непрерывной электрохимической правки и дополнительного электрохимического анодного растворения удаляемого припуска при комбинированном шлифовании композиционного материала на основе ZrO₂, а также в обосновании перспективности интеграции данной технологии в концепцию гибридного станочного оборудования. **Методы исследования.** Эксперименты проводились на модернизированном плоскошлифовальном станке модели PP-600F, оснащённом двумя независимыми электрическими цепями: цепью непрерывной электрохимической правки (плотность тока 0,1...0,6 А/см²) и цепью анодного растворения удаляемого припуска (плотность тока 15...30 А/см²). В качестве инструмента использовались алмазные круги марки AC6 125/100 M1 – 100 % на медно-цинко-алюминиевой связке. Технологическая среда – нитритно-нитратный электролит (NaNO₂ – 3 %, NaNO₃ – 1 %, Na₂CO₃ – 0,5 %). Механические режимы: скорость резания 35 м/с, продольная подача 0,5...2,5 мм/мин, глубина резания 0,01...0,04 мм. Исследование топографии поверхности круга и обрабатываемого материала проводилось методами растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным спектральным анализом элементного состава. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что непрерывная электрохимическая правка обеспечивает направленное анодное растворение компонентов металлической связки (преимущественно алюминия, меди и цинка), формируя устойчивый режущий рельеф с обнажёнными алмазными зёрнами и межзёрновыми полостями для размещения электролита и продуктов обработки. Показано, что при одновременной работе цепей правки и анодного травления заготовки на поверхности алмазных зёрен и элементах связки формируются оксидные плёнки, выполняющие роль твёрдых смазок и снижающие интенсивность адгезионно-диффузионного взаимодействия в зоне контакта. Реализация дополнительного электрохимического разупрочнения удаляемого припуска обеспечивает снижение сил резания и контактных температур, предотвращая деформационное повреждение поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Обосновано, что разработанная технология комбинированного электроалмазного шлифования является технологической основой для проектирования гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и электрохимические воздействия, что отвечает современным требованиям модульности, адаптивности и цифрового управления. Полученные результаты вносят вклад в формирование теоретико-методологического базиса проектирования гибридных металлообрабатывающих систем нового поколения.

Для цитирования: Формирование режущего рельефа алмазного круга на металлической связке посредством непрерывной электрохимической правки при комбинированном электроалмазном шлифовании композиционных материалов: к вопросу создания гибридного станочного оборудования / В.Ю. Скиба, А.Р. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, А.Д. Черников, М.В. Яворская, А.И. Насонов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 119–135. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-119-135.

*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент, в.н.с
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

Современная станкоинструментальная промышленность испытывает все возрастающую потребность в создании многофункционального оборудования, способного реализовывать в рамках единого технологического цикла различные по физической природе операции – механическую обработку, поверхностно-термическое упрочнение, электрохимическое воздействие [1, 2]. Концепция гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции на единой станочной платформе, формирует новую парадигму проектирования металлообрабатывающих систем, основанную на принципах модульности, адаптивности и цифрового управления [3, 4]. В условиях возрастающей сложности обрабатываемых деталей, роста спроса на многофункциональное оборудование и необходимости сокращения производственных циклов интеграция в станочное оборудование передовых технологий – электрохимической обработки, роботизации, цифрового моделирования и прогнозирования параметров обработки – становится необходимым условием конкурентоспособности отрасли [5, 6]. Существующие методологические подходы к проектированию станочного оборудования зачастую не учитывают многозадачность гибридных систем, сложность этапа предпроектных исследований и требования к модульности конструкции, а разрозненное использование различных технологий обработки приводит к увеличению числа операций, затрат времени и снижению точности [7, 8].

Особую роль в контексте гибридных технологий играет комбинированное электроалмазное шлифование (КЭАШ), представляющее собой синтез механического микрорезания алмазными зернами и электрохимических процессов, протекающих на контактных поверхностях инструмента и обрабатываемого материала [9–11]. Данная технология является прямым воплощением принципа интеграции разнородных технологических воздействий, лежащего в основе концепции гибридного оборудования нового поколения. Реализация КЭАШ требует решения ряда фундаментальных вопросов, связанных с формированием и поддержанием режущей способности алмазного инструмента, управле-

нием электрохимическими процессами в зоне резания и обеспечением стабильного качества обработки высокопрочных материалов [12, 13].

Процесс шлифования, независимо от вида технологической операции, характеризуется двумя доминирующими физическими механизмами – пластическим деформированием и трением в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов. Все сопутствующие явления – напряженное состояние поверхностного слоя, износ шлифовального круга, температурные градиенты, качество формируемой поверхности – представляют собой следствия указанных базовых процессов [14, 15]. Многообразие обрабатываемых конструкционных и инструментальных материалов, широкий спектр типов шлифовальных кругов на различных связках, а также специфика конкретных технологических операций определяют значительную вариативность протекающих процессов и обуславливают необходимость поиска общих фундаментальных закономерностей [9, 16].

Центральное место среди фундаментальных аспектов процесса шлифования занимает класс поверхностных явлений, протекающих на границе раздела инструментального и обрабатываемого материалов [17, 18]. Формирование граничного слоя происходит на атомно-молекулярном уровне в локальных точках фактического и физического контакта – активных центрах с наивысшей свободной энергией поверхности. Данные процессы носят дискретный характер, а их интенсивность определяется совокупностью физико-химических и термомеханических факторов – температурой и давлением в микрolumesах зоны контакта, составом среды и химическим сродством контактирующих материалов [19, 20]. Во всех случаях граничные процессы оказывают существенное влияние как на темп изнашивания шлифовальных кругов, так и на качество формируемой поверхности детали, что непосредственно определяет ее эксплуатационные свойства [21, 22].

Особую сложность представляет шлифование современных высокопрочных композиционных материалов, в частности керамических нанокompозитов на основе диборида циркония (ZrB_2), обладающих высокой твердостью (HV до 22...25 ГПа), термостойкостью и химической инертностью [23, 24]. Данные материалы на-

ходят применение в аэрокосмической технике, ядерной энергетике и других высокотехнологичных отраслях, где предъявляются экстремальные требования к эксплуатационным характеристикам деталей [25]. Шлифование подобных материалов в обычных условиях сопровождается интенсивным налипанием обрабатываемого материала на рабочую поверхность круга – засаливанием, которое приводит к критической потере режущей способности инструмента [26, 27]. Процесс засаливания усугубляется резкой динамикой температурных условий в зоне контакта, локальными областями повышенного напряжения и избыточного давления, что в совокупности делает шлифование неэффективным и требует частой правки круга [28].

Существует значительное количество методов правки шлифовальных кругов – механическая правка алмазными карандашами и роликами, электроэрозионная, электрохимическая, лазерная, ультразвуковая [29–31]. Однако периодическая правка неизбежно сопряжена с прерыванием процесса обработки, потерей производительности и нарушением стабильности качественных параметров. Альтернативой является непрерывная электрохимическая правка, реализуемая одновременно с процессом шлифования и обеспечивающая поддержание стабильной режущей способности круга в режиме самозатачивания [32, 33]. Сочетание непрерывной электрохимической правки с дополнительным анодным растворением удаляемого припуска обрабатываемого материала создает качественно новый технологический процесс – комбинированное электроалмазное шлифование, при котором достигается синергетический эффект механического и электрохимического воздействий [9, 34].

Несмотря на имеющиеся результаты в данной области, ряд принципиальных вопросов остается недостаточно изученным. Закономерности стадийного формирования режущего рельефа рабочей поверхности алмазного круга в условиях непрерывной электрохимической правки, механизмы образования и функциональная роль оксидных пленок на элементах связки при одновременной работе двух электрических цепей, влияние электрохимических процессов на адгезионно-диффузионное взаимодействие в зоне контакта – все эти вопросы требуют детального экспериментального исследования и теоретиче-

ского осмысления [35, 36]. Кроме того, принципиально важным представляется рассмотрение данной технологии в более широком контексте – как технологической основы для проектирования гибридного станочного оборудования, интегрирующего различные виды воздействий на обрабатываемый материал [37, 38].

Целью настоящей работы является установление закономерностей формирования поверхностного слоя алмазного круга на металлической связке на различных стадиях его функционирования – от начальной правки нового инструмента до стабильного шлифования в режиме самозатачивания – при комбинированном электроалмазном шлифовании композиционного материала на основе ZrB_2 с одновременной непрерывной электрохимической правкой и дополнительным анодным растворением удаляемого припуска, а также обоснование перспективности интеграции данной технологии в гибридные станочные системы нового поколения.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

- исследование топографии поверхности нового алмазного круга и идентификация факторов, препятствующих его непосредственному использованию без предварительной правки;
- установление закономерностей анодного растворения компонентов металлической связки при электрохимической правке и определение рациональных диапазонов плотности тока правки;
- изучение механизмов формирования оксидных пленок на поверхности алмазных зерен и элементах связки в условиях одновременной работы цепей правки и травления заготовки;
- оценка эффективности комбинированного электроалмазного шлифования диборида циркония по критериям качества обработанной поверхности и работоспособности инструмента;
- обоснование перспективности использования разработанной технологии в качестве базовой для проектирования гибридного станочного оборудования.

Методика исследований

Объект и условия исследования

В качестве инструмента использовались алмазные шлифовальные круги марки AC6 125/100 M1 – 100 % на медно-цинко-алюминиевой ме-

таллической связке. Данный тип связки широко применяется при шлифовании высокопрочных материалов и характеризуется высокой электропроводностью, что является необходимым условием реализации электрохимической правки [9]. Зернистость 125/100 мкм обеспечивает баланс между производительностью съема материала и достигаемой шероховатостью обработанной поверхности.

Обрабатываемым материалом служил композит на основе диборида циркония (ZrB_2), относящийся к классу ультравысокотемпературных керамик (УНТК). Этот материал характеризуется высокой твердостью (22...25 ГПа по Виккерсу), температурой плавления выше 3000 °С и высокой стойкостью к окислению при повышенных температурах [23, 24]. Указанные свойства обуславливают его перспективность для деталей аэрокосмического назначения и одновременно определяют значительные трудности при его механической обработке традиционными методами.

Оборудование и схема обработки

Эксперименты проводились на модернизированном плоскошлифовальном станке модели PP-600F, оснащенный специализированной системой комбинированной электроалмазной обработки (рис. 1). Модернизация станка включала в себя установку двух независимых источников электрического тока и специально спроектиро-

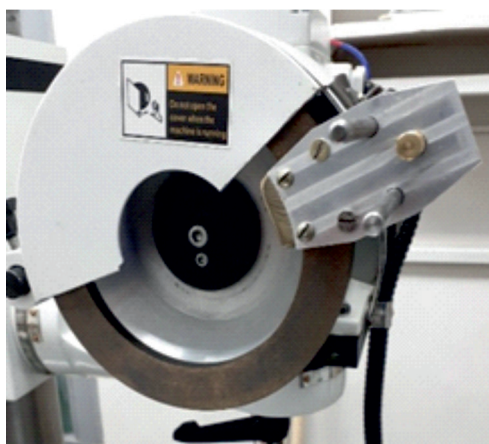
ванных электродных систем – катода правки, установленного в непосредственной близости от рабочей поверхности круга (рис. 1, а), и токосъемного устройства для подвода тока к обрабатываемой заготовке. Электрическая схема правки круга представлена на рис. 1, б.

Принципиальная особенность разработанной схемы состоит в одновременном функционировании двух электрических цепей – цепи непрерывной электрохимической правки (алмазный круг – анод, катод правки – катод) и цепи анодного растворения удаляемого припуска (обрабатываемая заготовка – анод, алмазный круг – катод). Данная компоновка реализует принцип двойного электрохимического воздействия: со стороны инструмента – обеспечение стабильной режущей способности круга за счет селективного растворения связки, со стороны заготовки – разупрочнение поверхностного слоя удаляемого припуска за счет анодного растворения, что существенно снижает механическую составляющую процесса шлифования [9, 34].

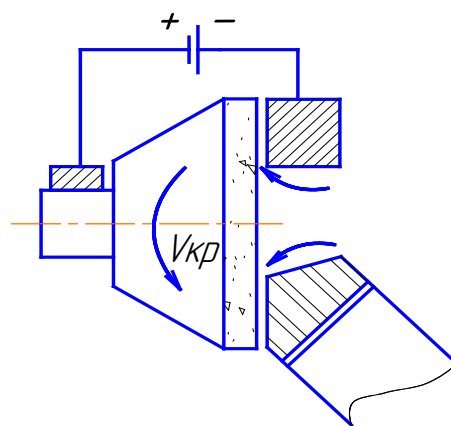
Общий вид станда для комбинированного электроалмазного шлифования и схема метода представлены на рис. 2.

Технологические параметры

В качестве технологической среды использовался нитритно-нитратный электролит следующего состава: $NaNO_3$ – 3 %, $NaNO_2$ – 1 %, Na_2CO_3 – 0,5 %. Выбор такого состава обуслов-



а



б

Рис. 1. Схема электрохимической правки алмазного круга на станке PP-600F:

а – круг с установленным катодом; б – электрическая схема правки круга

Fig. 1. Schematic of electrochemical dressing of the diamond wheel on the PP-600F machine:

а – wheel with installed cathode; б – electrical circuit for wheel dressing

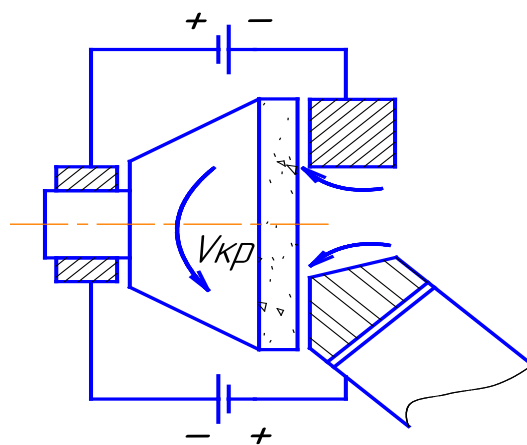
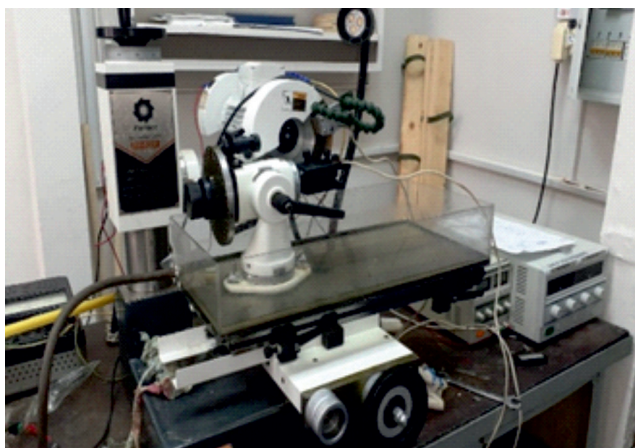


Рис. 2. Вид станда для шлифования и схема комбинированного метода

Fig. 2. View of the grinding stand and scheme of the combined method

лен его высокой электропроводностью, антикоррозионными свойствами и способностью обеспечивать формирование пассивирующих оксидных пленок на поверхности металлической связки [32].

Электрические режимы обработки: плотность тока правки устанавливалась в диапазоне от 0,1 до 0,6 А/см²; плотность тока анодного травления удаляемого припуска – 15...30 А/см². Механические режимы: скорость резания $V_{кр} = 35$ м/с; продольная подача $S_{пр} = 0,5...2,5$ м/мин; глубина резания $t = 0,01...0,04$ мм. Указанные диапазоны режимов были определены на основании предварительных экспериментов и данных из научной литературы [9, 27, 34].

Методы анализа

Исследование топографии и морфологии рабочей поверхности алмазного круга на различных стадиях его функционирования – до правки, после электрохимической правки, в процессе комбинированного шлифования – проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Анализ элементного состава поверхностных слоев осуществлялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), позволяющим определять распределение химических элементов в микрообъемах исследуемых областей.

Для выявления характера формирующихся оксидных пленок и идентификации их фазового состава использовались данные спектрального анализа контактных поверхностей, полученные после длительного шлифования при увеличен-

ных электрических и механических режимах. Повышение режимных параметров при длительной обработке было необходимым условием получения выраженных контактных граничных слоев, пригодных для инструментального анализа, учитывая, что при штатном шлифовании время контакта единичного алмазного зерна с обрабатываемым материалом составляет порядка $10^{-5}...10^{-7}$ с, а размеры формирующихся граничных слоев чрезвычайно малы [17, 39].

Результаты и их обсуждение

Состояние поверхности нового алмазного круга

Рабочая поверхность нового алмазного круга, сформированная на стадии его изготовления, характеризуется неразвитой структурой с минимальным обнажением алмазных зерен (рис. 3, а). Алмазные зерна практически полностью погружены в матрицу металлической связки, что исключает возможность их эффективного участия в процессе микрорезания. Микроскопические исследования показали, что попытки шлифования новым алмазным кругом без предварительной правки не приводят к удовлетворительным результатам: немногочисленные зерна, частично выступающие над поверхностью связки, либо подвергаются разрушению вследствие чрезмерных локальных нагрузок, либо работают непродолжительное время с преобладающим диффузионным характером износа (рис. 3, б). Рядом с разрушенным зерном в центре изображения наблюдается алмазное зерно, расположенное

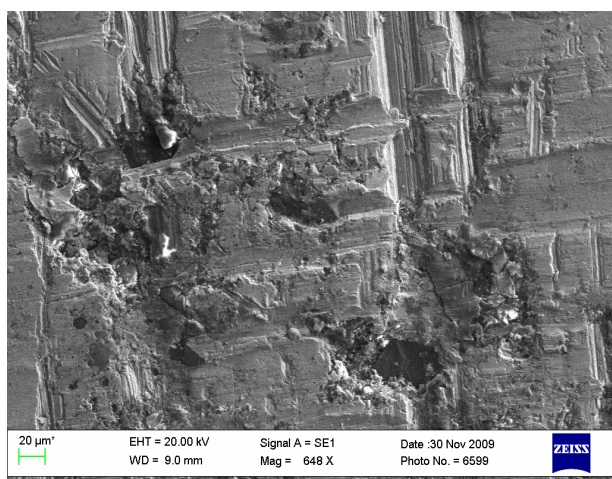
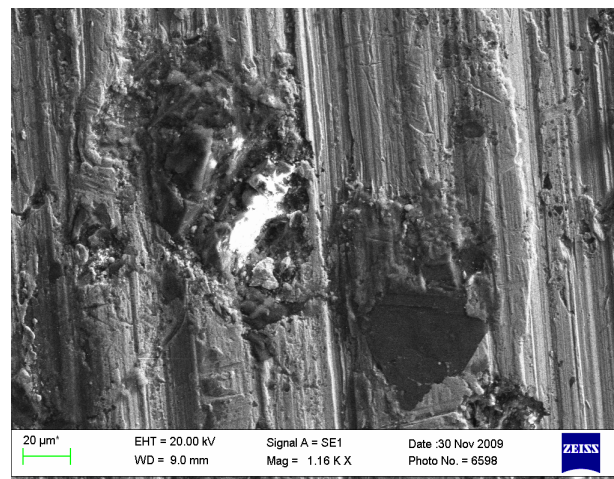

a

б

Рис. 3. Поверхность нового алмазного круга AC6 125/100 M1 – 100 %:

a – общий вид; *б* – область с разрушенным алмазным зерном и зерном ниже уровня связки

Fig. 3. Surface of a new diamond wheel AC6 125/100 M1 – 100 %:

a – general view; *б* – area with a fractured diamond grain and a grain below the bond level

ниже уровня поверхности круга и не участвовавшее в процессе резания. Высокие контактные температуры и силы трения при таком характере взаимодействия, как правило, приводят к термическому повреждению обрабатываемого изделия. Это наблюдение подтверждает принципиальную необходимость формирования рабочего профиля поверхности круга перед началом его эксплуатации.

Потеря режущей способности вследствие засаливания

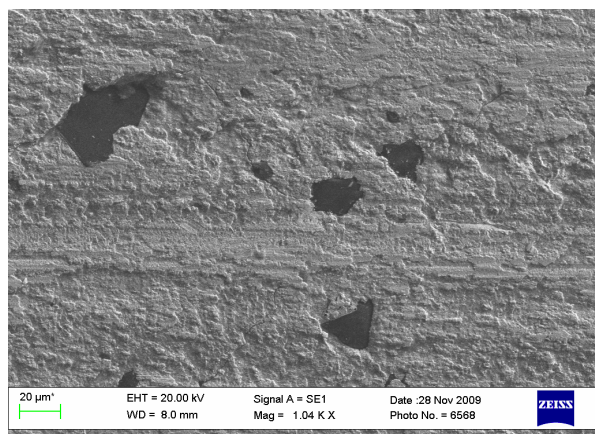
При шлифовании композиционных материалов в условиях, не обеспечивающих электрохимическую правку, рабочая поверхность алмазного круга подвергается интенсивному засаливанию. Процесс засаливания включает в себя несколько взаимосвязанных механизмов: механическое налипание микрочастиц обрабатываемого материала в межзерновые пространства, адгезионное схватывание при высоких контактных температурах и давлениях, а также химическое взаимодействие компонентов обрабатываемого материала и связки [26, 27]. Микроскопические изображения засаленной поверхности круга (рис. 4, *a, б*) демонстрируют формирование сплошного слоя налипшего материала, в котором алмазные зерна расположены ниже его уровня и полностью утрачивают режущую функцию.

Засаленный слой обладает низкой теплопроводностью по сравнению с алмазными зернами, что дополнительно усугубляет температурные условия в зоне контакта. Результирующее повышение температуры интенсифицирует адгезионно-диффузионные процессы и ускоряет потерю работоспособности круга, создавая положительную обратную связь в цикле деградации инструмента. Эта проблема является типичной при обработке любых высокопрочных и труднообрабатываемых материалов и представляет собой одно из основных технологических ограничений традиционного алмазного шлифования [28, 40].

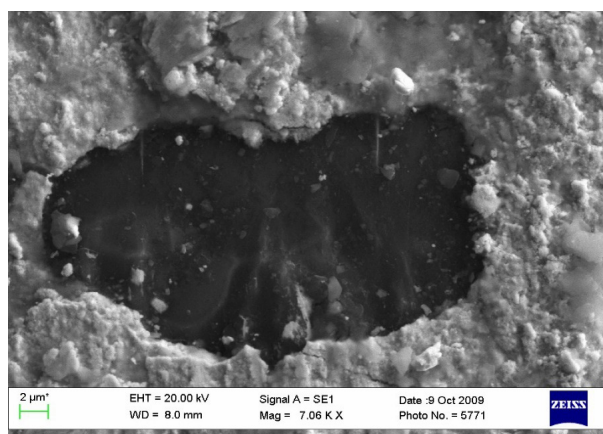
Непрерывная электрохимическая правка: формирование режущего рельефа

Для решения проблемы засаливания в настоящей работе применена непрерывная электрохимическая правка алмазного круга, реализуемая одновременно с процессом шлифования. Физическая сущность метода заключается в селективном анодном растворении компонентов металлической связки круга в среде электролита под действием электрического тока, подаваемого между кругом (анодом) и катодом правки (рис. 1, *a, б*).

Установлено, что при воздействии электрического тока в результате анодных процессов наиболее интенсивно растворяются элементы связки с относительно низким электрохимиче-



a



б

Рис. 4. Поверхность круга, покрытая засаленным слоем:

a – общий вид; б – детализация

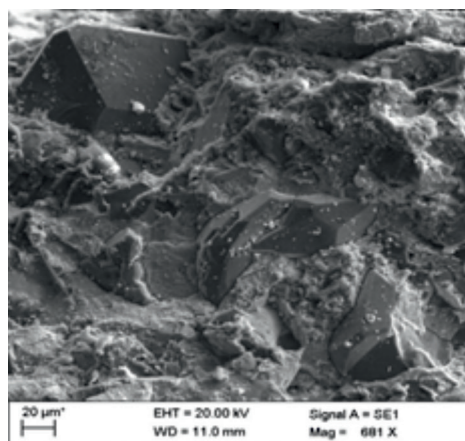
Fig. 4. Wheel surface covered with a clogged layer:

a – general view; б – detail view

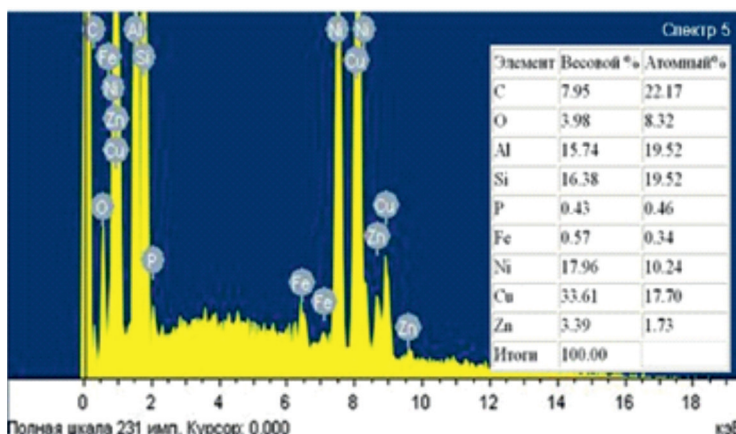
ским потенциалом – прежде всего алюминий, медь и цинк. Такое избирательное растворение приводит к постепенному обнажению алмазных зерен, ранее закрытых слоем связки. На рис. 5, а представлена поверхность алмазного круга после электрохимической правки. Спектральный анализ поверхности (рис. 5, б) подтверждает преимущественное удаление указанных металлов из приповерхностного слоя связки.

Как видно из рис. 5, а, после электрохимической правки поверхность круга отличается выраженным развитым рельефом. Алмазные зерна надежно закреплены в матрице связки

и существенно выступают над ее уровнем. По периферии зерен сформированы углубления – межзерновые полости, выполняющие несколько важных функций: обеспечение доступа электролита к зоне анодных реакций, отвод продуктов электрохимических реакций и удаленных фрагментов обрабатываемого материала, а также создание условий для эффективного охлаждения зоны резания. Подобная топография поверхности круга обеспечивает оптимальные условия для механического микрорезания: каждое обнаженное зерно функционирует как единичный резец с определенной геометрией и глубиной



a



б

Рис. 5. Поверхность алмазного круга после правки и ее спектральный анализ:

a – топография поверхности; б – спектр ЭДС

Fig. 5. Surface of the diamond wheel after dressing and its spectral analysis:

a – surface topography; б – EDS spectrum

внедрения, что обеспечивает стабильную и прогнозируемую режущую способность инструмента [32, 33].

Рациональные режимы электрохимической правки определяются балансом между интенсивностью растворения связки (необходимой для обнажения зерен) и сохранением удерживающей способности связки (необходимой для предотвращения преждевременного выкрашивания зерен). Экспериментально установлено, что оптимальная плотность тока правки зависит от свойств обрабатываемого материала и может варьироваться в пределах от 0,1 до 0,6 А/см². При обработке высокопрочных композитов на основе ZrB₂ рекомендуются значения из верхней части указанного диапазона (0,4...0,6 А/см²), что обусловлено повышенной интенсивностью засаливания данных материалов.

Комбинированное электроалмазное шлифование с анодным растворением припуска

Принципиальной особенностью разработанной технологии является реализация дополнительного электрохимического анодного растворения удаляемого припуска с обрабатываемой поверхности заготовки, осуществляемого параллельно с механическим шлифованием и непрерывной правкой круга. Физическая сущность этого воздействия заключается в предварительном разупрочнении поверхностного слоя заготовки в зоне предстоящего контакта с алмазными зернами: анодное растворение нарушает межатомные связи в кристаллической решетке материала, формирует модифицированный слой с пониженными механическими характеристиками и создает условия для значительного снижения сил резания [9, 34].

В результате реализуется качественно новый технологический процесс: алмазный круг, обладающий высокими режущими свойствами благодаря непрерывной правке, зачищает разупрочненный анодным растворением слой с минимальными силами резания и контактными температурами, не вызывая деформационного повреждения поверхностного слоя изделия. Схема комбинированного метода и общий вид модернизированного станда представлены на рис. 2. По существу, в данной технологии функцию первого режущего воздействия выполняет электрический ток, раз-

упрочняющий удаляемый припуск, а функцию второго – алмазный шлифовальный круг, осуществляющий финишное удаление модифицированного слоя.

Формирование оксидных пленок и их функциональная роль

При одновременном функционировании двух электрических цепей – цепи правки и цепи анодного травления – на поверхности алмазного круга протекают сложные электрохимические процессы, приводящие к образованию оксидных пленок на элементах связки и боковых поверхностях алмазных зерен. На рис. 6 представлен вид поверхности круга после комбинированной электроалмазной обработки диборида циркония. Отчетливо видны алмазные зерна, выступающие над связкой, боковые поверхности которых покрыты пленкой, образовавшейся в результате электрохимических реакций между связкой круга и электролитом в присутствии кислорода.

Природа формирующихся пленок определяется составом металлической связки и условиями электрохимического процесса. Металлы, входящие в состав связки алмазных кругов, – медь (Cu), алюминий (Al), никель (Ni), цинк (Zn), олово (Sn), – при анодном окислении в присутствии кислорода способны формировать оксиды различного стехиометрического состава: Cu₂O и CuO, Al₂O₃, NiO, ZnO, SnO₂ [41, 42]. Совокупность таких оксидов образует на поверхности связки и прилегающих участках алмазных зерен сплошной многокомпонентный слой, обладающий рядом функционально значимых свойств.

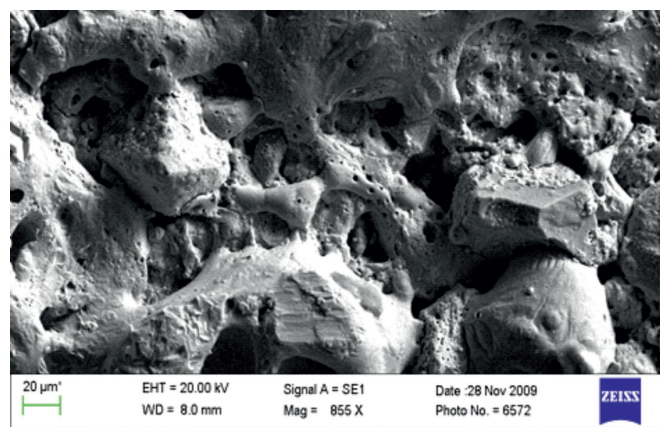


Рис. 6. Вид поверхности круга после комбинированной электроалмазной обработки диборида циркония

Fig. 6. View of the wheel surface after combined electro-diamond processing of zirconium diboride

Важнейшим из этих свойств является способность оксидных пленок выполнять роль твердых смазок в зоне шлифования. Оксиды меди и цинка характеризуются низким коэффициентом трения при скольжении по поверхности высокопрочных керамик, что способствует снижению фрикционной составляющей сил резания [43, 44]. Оксид алюминия (Al_2O_3), обладая высокой твердостью и химической инертностью, формирует устойчивый защитный барьер, предотвращающий непосредственный контакт металлической связи с обрабатываемым материалом и тем самым снижающий интенсивность адгезионного схватывания и диффузионного износа [45, 46]. Таким образом, оксидные пленки выполняют двойную функцию: снижают трение в зоне контакта и защищают алмазные зерна от преждевременного износа, увеличивая ресурс инструмента.

Анализ контактных граничных процессов

Одной из принципиальных трудностей экспериментального исследования контактных процессов при шлифовании является чрезвычайно малая продолжительность взаимодействия единичного алмазного зерна с обрабатываемым материалом – порядка $10^{-5} \dots 10^{-7}$ с [17, 47]. Граничные слои, в которых развиваются процессы массопереноса, адгезионного схватывания и фазовых превращений, имеют характерные размеры на нанометровом и субмикрометровом уровнях. Обнаружение и идентификация таких слоев экспериментальным путем на исследуемых образцах представляет значительную методическую сложность. Даже применение высоко разрешающих методов – растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и химического анализов – требует наличия образцов с более выраженным контактным граничным слоем, что возможно только при длительной обработке на увеличенных режимах [39, 48].

Именно поэтому часть экспериментов в настоящей работе была проведена при длительном шлифовании алмазными кругами на увеличенных механических и электрических режимах. Такой подход позволил сформировать на контактных поверхностях слои, пригодные для инструментального анализа, и получить достоверную информацию о составе и структуре граничных образований. Анализ этой информации подтверждает, что при комбинированном

электроалмазном шлифовании на контактных поверхностях протекают процессы как окислительного, так и адгезионно-диффузионного характера, совокупное действие которых определяет режущую способность круга, его износостойкость и качество формируемой поверхности изделия [21, 22, 49].

Перспективы интеграции в гибридное станочное оборудование

Полученные результаты имеют непосредственное значение для проектирования гибридного станочного оборудования нового поколения, интегрирующего механические и электрохимические (поверхностно-термические) технологические операции на единой станочной платформе. Разработанная технология комбинированного электроалмазного шлифования демонстрирует все ключевые характеристики, предъявляемые к технологическим процессам гибридного оборудования в рамках концепции Индустрии 4.0: многофункциональность (одновременное шлифование, правка и электрохимическое разупрочнение), управляемость (возможность независимого регулирования электрических и механических параметров), адаптивность (возможность настройки режимов для различных обрабатываемых материалов), модульность (электрохимическая подсистема интегрируется в стандартную станочную систему в виде функционального модуля) [2, 5, 6].

В контексте создания гибридных металлообрабатывающих систем технология КЭАШ может рассматриваться как один из базовых технологических модулей, интегрируемых в станочное оборудование наряду с модулями поверхностно-термической обработки (индукционный нагрев, лазерное упрочнение), модулями позиционирования и базирования, а также модулями цифрового управления и мониторинга [3, 7]. Модернизированный станок PP-600F, использованный в настоящей работе, по существу представляет собой прототип гибридной станочной системы, реализующей принцип интеграции разнородных воздействий. Дальнейшее развитие данного подхода предполагает создание полноценных гибридных станочных комплексов с цифровыми двойниками, системами адаптивного управления на основе методов машинного

обучения и интеграцией в производственные экосистемы (MES/ERP) [4, 8, 50].

Важно подчеркнуть, что необходимость создания комплексного подхода к проектированию гибридных систем, объединяющего современные принципы автоматизации, цифрового моделирования и прогнозирования параметров обработки, обусловлена не только техническими, но и экономическими факторами. Разрозненное использование различных технологий обработки приводит к увеличению числа операций, затрат времени, погрешностей базирования и, как следствие, к снижению точности и увеличению себестоимости продукции [7, 37]. Интеграция операций на одной станочной платформе позволяет существенно сократить производственный цикл, минимизировать межоперационные припуски и обеспечить стабильно высокое качество обработки, что является ключевым конкурентным преимуществом гибридного оборудования [38, 50].

Заключение

1. Исследована топография рабочей поверхности нового алмазного круга AC6 125/100 M1 на металлической связке. Установлено, что на стадии изготовления круга его поверхность характеризуется неразвитой структурой с минимальным обнажением алмазных зерен, что исключает его непосредственное использование без предварительной правки. Попытки шлифования новым кругом приводят к разрушению отдельных зерен и термическому повреждению обрабатываемого изделия.

2. Установлены закономерности формирования режущего рельефа рабочей поверхности алмазного круга при непрерывной электрохимической правке. Показано, что при анодном растворении компонентов металлической связки (Al, Cu, Zn) в нитритно-нитратном электролите формируется устойчивая топография поверхности с обнаженными алмазными зернами и межзерновыми полостями, обеспечивающими условия для стабильного режима самозатачивания. Определено, что рациональные значения плотности тока правки составляют $0,1 \dots 0,6 \text{ А/см}^2$ в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

3. Показано, что при одновременном функционировании цепей электрохимической правки

и анодного травления заготовки на поверхности алмазных зерен и элементах связки формируются многокомпонентные оксидные пленки (Cu_2O , CuO , Al_2O_3 , ZnO), выполняющие функцию твердых смазок. Оксидные пленки снижают фрикционную составляющую сил резания, препятствуют адгезионному схватыванию и защищают алмазные зерна от преждевременного диффузионного износа.

4. Обосновано, что реализация дополнительного электрохимического разупрочнения удаляемого припуска при плотности тока $15 \dots 30 \text{ А/см}^2$ обеспечивает формирование модифицированного поверхностного слоя заготовки с пониженными механическими характеристиками, что позволяет осуществлять шлифование композита на основе ZrB_2 с минимальными силами резания и контактными температурами без деформационного повреждения обрабатываемой поверхности.

5. Результаты исследования формируют технологическую основу для проектирования гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и электрохимические воздействия на единой станочной платформе. Разработанная технология комбинированного электроалмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой и анодным растворением припуска удовлетворяет ключевым требованиям гибридных металлообрабатывающих систем – модульности, управляемости, адаптивности и совместимости с принципами цифрового управления, – что подтверждает перспективность ее использования как базового технологического модуля при создании гибридного оборудования нового поколения.

Список литературы

1. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
2. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives / Z. Zhu, V.G. Dhokia, A. Nassehi, S.T. Newman // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 26 (7). – P. 596–615. – DOI: 10.1080/0951192X.2012.749530.
3. Bulk forming of sheet metal / M. Merklein, J.M. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A.E. Tekkaya, A. Weckenmann //



CIRP Annals. – 2012. – Vol. 61 (2). – P. 725–745. – DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.007.

4. Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception / X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, L. Wang // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 61. – P. 530–535. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.

5. Hybrid manufacturing based on the combination of mechanical and electro physical–chemical processes / B. Lauwers, N. Chernovol, B. Peeters, D.V. Camp, T.V. Riel, J. Qian // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 95. – P. 649–661. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.003.

6. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aerospace alloy using mounted grinding points / D.T. Curtis, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, C. Sage // CIRP Annals. – 2009. – Vol. 58 (1). – P. 173–176. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.074.

7. Schuh G., Kreysa J., Orilski S. Roadmap “Hybride Produktion”: Wie 1+1=3-Effekte in der Produktion maximiert werden können // Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. – 2009. – Vol. 104 (5). – P. 385–391. – DOI: 10.3139/104.110072.

8. Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review / W.-S. Chu, C.-S. Kim, H.-T. Lee, J.-O. Choi, J.-I. Park, J.-H. Song, K.-H. Jang, S.-H. Ahn // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2014. – Vol. 1 (1). – P. 75–92. – DOI: 10.1007/s40684-014-0012-5.

9. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации. – Старый Оскол: ТНТ, 2020. – 336 с. – ISBN 978-5-94178-390-8.

10. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, С.А. Янюшкин, В.Ю. Попов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – 2012. – Т. 1. – С. 183–190. – EDN: PHEATT.

11. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // Технология металлов. – 2010. – № 1. – С. 25–33. – EDN: LATDOH.

12. Кудряшов С.М., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Использование минеральных рассолов для устранения засаленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке быстрорежущей стали P6M5 // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 2 (6). – С. 109–118. – EDN: NEAKJX.

13. Kostyukevich P.A., Kuzey A.M. Effect of diamond abrasive processing conditions on the structure of the damaged layer of a diamond single crystal // Journal of Friction and Wear. – 2025. – Vol. 46 (1). – P. 33–38. – DOI: 10.3103/S1068366625700278.

14. Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. – 2nd ed. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0831132477.

15. Rowe W.B. Principles of modern grinding technology. – 2nd ed. – Oxford: William Andrew, 2014. – 480 p. – ISBN 978-0-323-24271-4. – DOI: 10.1016/C2013-0-06952-6.

16. Handbook of machining with grinding wheels / I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, I. Inasaki. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 725 p. – ISBN 978-1-4822-0670-8.

17. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 799–800. – P. 291–298. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291.

18. Rapid grinding diamond film using a grinding wheel containing nickel-plated diamond abrasives based on mechanochemical effect / Y. Zhou, Y. Wang, S. Su, L. Zhao, M. Zhao, Y. Yuan, J. Zang, J. Lu, X. Xu, P. Zhang // Diamond and Related Materials. – 2023. – Vol. 139. – P. 110389. – DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110389.

19. Johnson K.L. Adhesion and friction between a smooth elastic spherical asperity and plane surface // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1997. – Vol. 453. – P. 163–179. – DOI: 10.1098/rspa.1997.0010.

20. Maugis D. Contact, adhesion and rupture of elastic solids. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2000. – 425 p. – ISBN 978-3-662-04125-3. – DOI: 10.1007/978-3-662-04125-3.

21. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. The process of composite materials machining cutting tools profiling // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 944–949. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.576.

22. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 137–149. – EDN: VSDDAJ.

23. Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environments // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 129. – P. 94–99. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.018.

24. Saheb N., Hayat U., Syed Fida H. A review of the properties of hybrid ceramic nanocomposites // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. – 2025. – Vol. 64 (3). – P. 100438. – DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.03.001.

25. UHTCs: ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications / E. Wuchina, E. Opila, M. Opeka, B. Fahrenholtz, I. Talmy // The Electrochemical Society Interface. – 2007. – Vol. 16 (4). – P. 30–36. – DOI: 10.1149/2.F04074IF.

26. Experimental research on wear mechanism of diamond wheels for grinding Cf/SiC composites grooves / B. Chen, H. Xu, Y. Guo, B. Guo, G. Liu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 27. – P. 2382–2398. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.10.085.
27. Янюшкин А.Р., Попов В.Ю., Хлыстов А.Н. Потеря режущей способности алмазных зерен при шлифовании композиционного материала на основе диборида циркония // *Системы. Методы. Технологии*. – 2025. – № 1 (65). – С. 23–30. – DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-23-30.
28. A vitrified bond diamond grinding wheel prepared by DLP and grinding performance on single crystal silicon wafer / J. Zeng, F. Zhang, P. Gao, W. Yang, X. Pan // *Ceramics International*. – 2026. – Vol. 52 (8). – P. 9776–9788. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.01.153.
29. Deng H., Xu Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: a review // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 45. – P. 46–69. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.020.
30. Патент № 2304504 С2 Российская Федерация, МПК В24В 53/00, В23Н 3/00. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления: № 2005102264/02: заявл. 31.01.2005: опубл. 20.08.2007 / А.С. Янюшкин, А.А. Сурьев, Р.А. Иващенко, П.В. Архипов, С.А. Якимов, А.Б. Люсев; заявитель Братский государственный университет. – EDN XHYYWK.
31. Elucidating diamond grinding wheel surface characteristics through integrated optical microscopic reconstruction system / L. Li, B. Li, Z. Lu, D. Duan, X. Wei // *Measurement*. – 2026. – Vol. 258, pt. B. – P. 119150. – DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119150.
32. Rowe W.B., Chen X. Grinding wheel dressing // Rowe W.B., Chen X. *Principles of modern grinding technology*. – 3rd ed. – William Andrew, 2026. – Ch. 4. – P. 73–95. – DOI: 10.1016/B978-0-443-28936-1.00006-8.
33. Kramer D., Rehsteiner F., Schumacher B. ECD (Electrochemical in-process controlled dressing), a new method for grinding of modern high-performance cutting materials to highest quality // *CIRP Annals*. – 1999. – Vol. 48 (1). – P. 265–268. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63180-1.
34. Effect of direct current and pulse plating on the EDM performance of copper-zirconium diboride composites / D. Guo, M. Zhang, Z. Jin, R. Kang // *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*. – 2007. – Vol. 14 (5). – P. 464–468. – DOI: 10.1016/S1005-8850(07)60091-7.
35. Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding / D. Zhu, Y.B. Zeng, Z.Y. Xu, X.Y. Zhang // *CIRP Annals*. – 2011. – Vol. 60 (1). – P. 247–250. – DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.130.
36. Effect of tool-sidewall outlet hole design on machining performance in electrochemical mill-grinding of Inconel 718 / S. Niu, N. Qu, X. Yue, H. Li // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 41. – P. 10–22. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.03.027.
37. Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part II): Design processes and enablers / J. Leng, J. Guo, J. Xie, X. Zhou, A. Liu, X. Gu, D. Mourtzis, Q. Qi, Q. Liu, W. Shen, L. Wang // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2025. – Vol. 79. – P. 528–562. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.02.005.
38. A review of hybrid manufacturing: integrating subtractive and additive manufacturing / B. Freitas, V. Richhariya, M. Silva, A. Vaz, S.F. Lopes, Ó. Carvalho // *Materials (Basel)*. – 2025. – Vol. 18 (18). – P. 4249. – DOI: 10.3390/ma18184249.
39. Солдатенков И.А. Контактная задача при объемном приложении сил межмолекулярного взаимодействия: функция влияния для неоднородного упругого полупространства // *Прикладная математика и механика*. – 2018. – Т. 82, № 3. – С. 358–371. – DOI: 10.7868/S0032823518030086.
40. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels / C. Guo, Z. Shi, H. Attia, D. McIntosh // *CIRP Annals*. – 2007. – Vol. 56 (1). – P. 343–346. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.079.
41. Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // *Материаловедение*. – 2011. – № 2. – С. 2–8. – EDN: NTCHIP.
42. Yu N., Polycarpou A.A. Adhesive contact based on the Lennard–Jones potential: a correction to the value of the equilibrium distance as used in the potential // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2004. – Vol. 278 (2). – P. 428–435. – DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.029.
43. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: a comprehensive review // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 127. – P. 1–18. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.146.
44. Parameter optimization during minimum quantity lubrication milling of TC4 alloy with graphene-dispersed vegetable-oil-based cutting fluid / M. Li, T. Yu, L. Yang, H. Li, R. Zhang, W. Wang // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 209. – P. 1508–1522. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.147.
45. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами. ЖЭТФ, 29, 94,



1955 // Лифшиц Е.М. Избранные труды / под ред. Л.П. Питаевского, Ю.Г. Рудого. – М.: Физматлит, 2004. – С. 306–323. – ISBN 5-9221-0484-5.

46. An investigation of carbon nanofluid minimum quantity lubrication for grinding unidirectional carbon fibre-reinforced ceramic matrix composites / S. Qu, Y. Gong, Y. Yang, W. Wang, C. Liang, B. Han // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 249. – P. 119353. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119353.

47. *Shaw M.C.* Principles of abrasive processing. – Oxford: Clarendon Press, 1996. – 574 p. – ISBN 978-0198590217.

48. Predictive model for minimum chip thickness and size effect in single diamond grain grinding

of zirconia ceramics under different lubricating conditions / M. Yang, C. Li, Y. Zhang, D. Jia, R. Li, Y. Hou, H. Cao, J. Wang // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45 (12). – P. 14908–14920. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.226.

49. *Li H.N., Axinte D.* Textured grinding wheels: a review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 109. – P. 8–35. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001.

50. *Mourtzis D., Vlachou E., Milas N.* Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 55. – P. 290–295. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.038.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Formation of the cutting relief of a metal-bonded diamond wheel through continuous electrochemical dressing in combined electro-diamond grinding of composite materials: toward the development of hybrid machine tool equipment

Vadim Skeebe^{1, a, *}, Andrey Yanyushkin^{2, b}, Dmitry Lobanov^{2, c}, Alexander Yanyushkin^{2, d},
 Alexey Chernikov^{1, e}, Maria Yavorskaya^{1, f}, Alexander Nasonov^{1, g}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>, andreyanyushkin@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, yanyushkinas@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>, aleksey.chernikov.97@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-2449-8638>, ivanova777888@yandex.ru;

^g <https://orcid.org/0009-0001-3177-0732>, a.nasonov@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 February 2026

Revised: 16 March 2026

Accepted: 21 March 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Metal-bonded diamond wheel
 Combined electro-diamond grinding
 Continuous electrochemical dressing
 Composite materials
 Cutting ability
 Oxide films
 Hybrid machine tool equipment
 Anodic dissolution of stock allowance

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2026-0005).

ABSTRACT

Introduction. One of the key trends in modern mechanical engineering is the development of hybrid machine tool equipment that integrates mechanical and surface-thermal technological operations within a single machine platform. In the context of the *Industry 4.0* paradigm and increasing demands for precision, productivity, and equipment multifunctionality, combined electro-diamond grinding (CEDG) – which combines mechanical cutting by diamond grains with electrochemical action on both the tool and the workpiece – is of particular relevance. Grinding of high-strength composite materials based on zirconium diboride (ZrB_2) under conventional conditions leads to intensive clogging of metal-bonded diamond wheels and a critical loss of their cutting ability, rendering the conventional process inefficient. Despite existing results in the field of electro-diamond machining, the issues of stage-by-stage formation of the cutting relief on the wheel working surface under continuous electrochemical dressing, the mechanisms of oxide film formation on bond elements, and their functional role as solid lubricants in the contact zone remain insufficiently studied. **The purpose of this work** is to establish the formation mechanisms of the surface layer of a metal-bonded diamond wheel under continuous electrochemical dressing with simultaneous electrochemical anodic dissolution of the stock allowance during combined grinding of a ZrB_2 -based composite material, and to substantiate the prospects for integrating this technology into the concept of hybrid machine tool equipment. **Methods.** Experiments were conducted on a modernized PP-600F surface grinding machine equipped with two independent electrical circuits: a continuous electrochemical dressing circuit (current density 0.1–0.6 A/cm²) and an anodic dissolution circuit for stock removal (current density 15–30 A/cm²). Diamond wheels AC6 125/100 M1 – 100% on a copper-zinc-aluminum bond were used as the tool. The working medium was a nitrite-nitrate electrolyte (3% $NaNO_2$, 1% $NaNO_3$, 0.5% Na_2CO_3). Mechanical parameters: cutting speed 35 m/s, longitudinal feed 0.5–2.5 m/min, depth of cut 0.01–0.04 mm. Surface topography of the wheel and workpiece was investigated by scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). **Results and Discussion.** It is established that continuous electrochemical dressing ensures selective anodic dissolution of the metal bond components (primarily aluminum, copper, and zinc), forming a stable cutting relief with exposed diamond grains and intergranular cavities for electrolyte and debris accommodation. It is shown that under simultaneous operation of the dressing and workpiece etching circuits, oxide films form on the diamond grain surfaces and bond elements, functioning as solid lubricants and reducing the intensity of adhesion-diffusion interaction in the contact zone. Implementation of additional electrochemical weakening of the stock allowance reduces cutting forces and contact temperatures, preventing deformation damage to the workpiece surface layer. It is substantiated that the developed CEDG technology constitutes a technological basis for designing hybrid machine tool equipment integrating mechanical and electrochemical actions, meeting modern requirements for modularity, adaptability, and digital control. The obtained results contribute to the formation of a theoretical and methodological framework for designing next-generation hybrid metalworking systems.

For citation: Skeebe V.Yu., Yanyushkin A.R., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Chernikov A.D., Yavorskaya M.V., Nasonov A.I. Formation of the cutting relief of a metal-bonded diamond wheel through continuous electrochemical dressing in combined electro-diamond grinding of composite materials: toward the development of hybrid machine tool equipment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 119–135. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-119-135. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebe Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
 Leading researcher
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel: +7 383 346-17-79, e-mail: skeebe_vadim@mail.ru



References

1. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
2. Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 26 (7), pp. 596–615. DOI: 10.1080/0951192X.2012.749530.
3. Merklein M., Allwood J.M., Behrens B.-A., Brosius A., Hagenah H., Kuzman K., Mori K., Tekkaya A.E., Weckenmann A. Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61 (2), pp. 725–745. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.007.
4. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 61, pp. 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
5. Lauwers B., Chernovol N., Peeters B., Camp D.V., Riel T.V., Qian J. Hybrid manufacturing based on the combination of mechanical and electro physical–chemical processes. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, pp. 649–661. DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.003.
6. Curtis D.T., Soo S.L., Aspinwall D.K., Sage C. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aerospace alloy using mounted grinding points. *CIRP Annals*, 2009, vol. 58 (1), pp. 173–176. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.074.
7. Schuh G., Kreysa J., Orilski S. Roadmap “Hybride Produktion”: Wie 1+1=3-Effekte in der Produktion maximiert werden können. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2009, vol. 104 (5), pp. 385–391. DOI: 10.3139/104.110072.
8. Chu W.-S., Kim C.-S., Lee H.-T., Choi J.-O., Park J.-I., Song J.-H., Jang K.-H., Ahn S.-H. Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, vol. 1 (1), pp. 75–92. DOI: 10.1007/s40684-014-0012-5.
9. Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya elektroalmaznogo zatachivaniya rezhushchikh instrumentov i metody ee realizatsii* [Technology of electro-diamond sharpening of cutting tools and methods of its implementation]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 336 p.
10. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A., Popov V.Yu. Fiziko-khimicheskoe vzaimodeistvie instrumental'nogo i obrabatyvaemogo materialov pri kombinirovannom elektrokhimicheskom shlifovanii [Physical and chemical interaction of tool and workpiece materials in combined electrochemical grinding]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri = Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences for the Development of Siberian Regions*, 2012, vol. 1, pp. 183–190.
11. Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V. Atomno-molekulyarnye protsessy v zone almaznogo kruga i obrabatyvaemogo materiala [Atomic-molecular processes in the zone of diamond wheel and workpiece material]. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*, 2010, no. 1, pp. 25–33.
12. Kudryashov S.M., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Ispol'zovanie mineral'nykh rassolov dlya ustraneniya zasalennogo sloya pri kombinirovannoi elektroalmaznoi obrabotke bystrorezhushchei stali R6M5 [Use of mineral brines for elimination of the greased layer at the combined electrodiamond processing of fast-cutting steel R6M5]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 2, pp. 109–118.
13. Kostyukovich P.A., Kuzey A.M. Effect of diamond abrasive processing conditions on the structure of the damaged layer of a diamond single crystal. *Journal of Friction and Wear*, 2025, vol. 46 (1), pp. 33–38. DOI: 10.3103/S1068366625700278.
14. Malkin S., Guo C. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. 2nd ed. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0831132477.
15. Rowe W.B. *Principles of modern grinding technology*. 2nd ed. Oxford, William Andrew, 2014. 480 p. ISBN 978-0-323-24271-4. DOI: 10.1016/C2013-0-06952-6.
16. Marinescu I.D., Hitchiner M.P., Uhlmann E., Rowe W.B., Inasaki I. *Handbook of machining with grinding wheels*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2016. 725 p. ISBN 978-1-4822-0670-8.
17. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Yu.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 799–800, pp. 291–298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.291.
18. Zhou Y., Wang Y., Su S., Zhao L., Zhao M., Yuan Y., Zang J., Lu J., Xu X., Zhang P. Rapid grinding diamond film using a grinding wheel containing nickel-plated diamond abrasives based on mechanochemical effect. *Diamond and Related Materials*, 2023, vol. 139, p. 110389. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110389.

19. Johnson K.L. Adhesion and friction between a smooth elastic spherical asperity and plane surface. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1997, vol. 453, pp. 163–179. DOI: 10.1098/rspa.1997.0010.
20. Maugis D. *Contact, adhesion and rupture of elastic solids*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2000. 425 p. ISBN 978-3-662-04125-3. DOI: 10.1007/978-3-662-04125-3.
21. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. The process of composite materials machining cutting tools profiling. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 944–949. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.576.
22. Popov V.Yu., Khlystov A.N., Bondin A.V. Atomnaya vizualizatsiya almaznogo rezaniya [Atomic visualization diamond cutting]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 137–149.
23. Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environments. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 129, pp. 94–99. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.018.
24. Saheb N., Hayat U., Syed Fida H. A review of the properties of hybrid ceramic nanocomposites. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2025, vol. 64 (3), p. 100438. DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.03.001.
25. Wuchina E., Opila E., Opeka M., Fahrenholtz W., Talmy I. UHTCs: ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications. *The Electrochemical Society Interface*, 2007, vol. 16 (4), pp. 30–36. DOI: 10.1149/2.F04074IF.
26. Chen B., Xu H., Guo Y., Guo B., Liu G. Experimental research on wear mechanism of diamond wheels for grinding Cf/SiC composites grooves. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 27, pp. 2382–2398. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.10.085.
27. Yanyushkin A.R., Popov V.Yu., Khlystov A.N. Poterya rezhushchei sposobnosti almaznykh zeren pri shlifovanii kompozitsionnogo materiala na osnove diborida tsirkoniya [Loss of cutting ability of diamond grains when grinding a composite material based on zirconium diboride]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2025, no. 1 (65), pp. 23–30. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-23-30.
28. Zeng J., Zhang F., Gao P., Yang W., Pan X. A vitrified bond diamond grinding wheel prepared by DLP and grinding performance on single crystal silicon wafer. *Ceramics International*, 2026, vol. 52 (8), pp. 9776–9788. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.01.153.
29. Deng H., Xu Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 45, pp. 46–69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.06.020.
30. Janjushkin A.S., Sur'ev A.A., Ivashchenko R.A., Arkhipov P.V., Jakimov S.A., Losev A.B. *Metod avtomaticheskogo upravleniya protsessom nepreryvnoi elektrokhimicheskoi pravki kruga i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Automatic control method for electrochemical dressing of grinding wheel and apparatus for performing the same]. Patent RF, no. 2304504, 2007.
31. Li L., Li B., Lu Z., Duan D., Wei X. Elucidating diamond grinding wheel surface characteristics through integrated optical microscopic reconstruction system. *Measurement*, 2026, vol. 258, pt. B, p. 119150. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119150.
32. Rowe W.B., Chen X. Grinding wheel dressing. Rowe W.B., Chen X. *Principles of modern grinding technology*. 3rd ed. William Andrew, 2026, ch. 4, pp. 73–95. DOI: 10.1016/B978-0-443-28936-1.00006-8.
33. Kramer D., Rehsteiner F., Schumacher B. ECD (Electrochemical in-process controlled dressing), a new method for grinding of modern high-performance cutting materials to highest quality. *CIRP Annals*, 1999, vol. 48 (1), pp. 265–268. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63180-1.
34. Guo D., Zhang M., Jin Z., Kang R. Effect of direct current and pulse plating on the EDM performance of copper-zirconium diboride composites. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 2007, vol. 14 (5), pp. 464–468. DOI: 10.1016/S1005-8850(07)60091-7.
35. Zhu D., Zeng Y.B., Xu Z.Y., Zhang X.Y. Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding. *CIRP Annals*, 2011, vol. 60 (1), pp. 247–250. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.130.
36. Niu S., Qu N., Yue X., Li H. Effect of tool-sidewall outlet hole design on machining performance in electrochemical mill-grinding of Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 41, pp. 10–22. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.03.027.
37. Leng J., Guo J., Xie J., Zhou X., Liu A., Gu X., Mourtzis D., Qi Q., Liu Q., Shen W., Wang L. Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part II): Design processes and enablers. *Journal of Manufacturing Systems*, 2025, vol. 79, pp. 528–562. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.02.005.
38. Freitas B., Richhariya V., Silva M., Vaz A., Lopes S.F., Carvalho Ó. A review of hybrid manufacturing: integrating subtractive and additive manufacturing. *Materials (Basel)*, 2025, vol. 18 (18), p. 4249. DOI: 10.3390/ma18184249.



39. Soldatenkov I.A. Kontaktnaya zadacha pri ob"emnom prilozhenii sil mezhmolekulyarnogo vzaimodeistviya: funktsiya vliyaniya dlya neodnorodnogo uprugogo poluprostranstva [The contact problem with the bulk application of intermolecular interaction forces: the influence function for an elastic 'layer-half-space' system]. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, vol. 82, no. 3, pp. 358–371. DOI: 10.7868/S0032823518030086. (In Russian).

40. Guo C., Shi Z., Attia H., McIntosh D. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56 (1), pp. 343–346. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.079.

41. Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Azarov A.S. Uchet vliyaniya troinogo vzaimodeistviya chastits sredy na poverkhnostnye i adgezionnye svoistva tverdykh tel [Accounting the triple interaction influence of environment particles on superficial and adhesive properties of solids]. *Materialovedenie = Material Science*, 2011, no. 2, pp. 2–8.

42. Yu N., Polycarpou A.A. Adhesive contact based on the Lennard–Jones potential: a correction to the value of the equilibrium distance as used in the potential. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 278 (2), pp. 428–435. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.029.

43. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 127, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.146.

44. Li M., Yu T., Yang L., Li H., Zhang R., Wang W. Parameter optimization during minimum quantity lubrication milling of TC4 alloy with graphene-dispersed vegetable-oil-based cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 209, pp. 1508–1522. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.147.

45. Lifshitz E.M. Teoriya molekulyarnykh sil prityazheniya mezhdru tverdymi telami [Theory of molecular attractive forces between solids]. Lifshits E.M. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, pp. 306–323. ISBN 5-9221-0484-5.

46. Qu S., Gong Y., Yang Y., Wang W., Liang C., Han B. An investigation of carbon nanofluid minimum quantity lubrication for grinding unidirectional carbon fibre-reinforced ceramic matrix composites. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 249, p. 119353. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119353.

47. Shaw M.C. *Principles of abrasive processing*. Oxford, Clarendon Press, 1996. 574 p. ISBN 978-0198590217.

48. Yang M., Li C., Zhang Y., Jia D., Li R., Hou Y., Cao H., Wang J. Predictive model for minimum chip thickness and size effect in single diamond grain grinding of zirconia ceramics under different lubricating conditions. *Ceramics International*, 2019, vol. 45 (12), pp. 14908–14920. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.04.226.

49. Li H.N., Axinte D. Textured grinding wheels: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 109, pp. 8–35. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001.

50. Mourtzis D., Vlachou E., Milas N. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.038.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).